

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

## BAKALÁRSKÁ PRÁCE

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroenergetiky

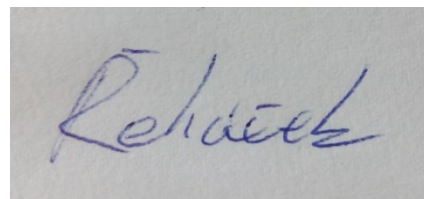
PROVOZ SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU

OPERATION OF SYNCHRONOUS GENERATOR

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 28. 4. 2016



.....

Řeháček

## **Poděkování**

V první řadě bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Radomírovi Goňovi, Ph.D. za poskytnuté učební materiály a informace při tvorbě bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Martinu Královi za odborné vedení a spolupráci při měření. A v neposlední řadě i své přítelkyni Kristýně Malinkové, která mi pomáhala s jazykovou a gramatickou úpravou a byla mi oporou po celou dobu.

## **Abstrakt**

Předložená bakalářská práce se zabývá principem a konstrukcí synchronních strojů. Jsou zde uvedeny základní charakteristiky generátoru pracujícího v ostrovním režimu. Dále je rozebrána problematika fázování a seznámení s podmínkami pro připojení do elektrizační soustavy a dovolenými odchylkami. V praktické části se zaměřím na fázovací řídicí systém UniGEN, vyráběn firmou UNIMA-SK a na následnou modifikaci měřicí úlohy zatěžovacích charakteristik synchronního generátoru.

## **Klíčová slova**

Synchronní stroj, synchronní generátor, stator, rotor, ostrovní režim, paralelní chod, UniGEN, fázování.

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with the principle and construction of synchronous machines. There are basic characteristics of generator working in island mode. Further analyzes problems of phasing and familiarization with the conditions for connection to the electricity grid and tolerances. In the practical part I will focus on phasing UniGEN control system, manufactured by UNIMA-SK and the subsequent modification of the measurement tasks of torque characteristics of a synchronous generator.

## **Key words**

Synchronous machine, synchronous generator, stator, rotor, standalone mode, parallel operation, UniGEN, phasing.

## Obsah

Úvod.....	1
1 Synchronní stroje.....	2
1.1 Konstrukční uspořádání: .....	2
1.2 Princip synchronního stroje:.....	3
1.3 Reakce kotvy .....	4
1.4 Náhradní schéma .....	5
2 Provozní stavy synchronního stroje: .....	7
2.1 Charakteristika naprázdno:.....	9
2.2 Charakteristika nakrátko: .....	10
2.3 Samostatně pracující synchronní stroj:.....	12
2.4 Paralelně pracující se sítí:.....	13
2.5 Fázování: .....	14
2.5.1 Přesné fázování: .....	14
2.5.2 Samosynchronizace:.....	21
2.6 Fázování na tmu .....	23
2.7 Provozní diagram: .....	23
3 Praktická část .....	25
3.1 Provozní parametry měřeného generátoru STC-2.....	25
3.2 Provozní parametry asynchronního motoru ABB M2BA 100 LC 4.....	26
3.3 UniGEN.....	27
3.4 Regulátor napětí UVR.....	27
3.5 Frekvenční měnič ABB ACS355 .....	28
3.6 Postup měření.....	29
3.7 Schéma zapojení.....	31
3.8 Postup při fázování.....	31
Závěr .....	33
Literatura .....	34
Přílohy .....	35

## Seznam použitých symbolů a zkratek

$n$	Otáčky rotoru synchronního stroje
$B$	magnetická indukce
$l$	aktivní délka rotorových tyčí
$v$	obvodová rychlost rotoru
$U_{ib}$	indukované napětí v kotvě působením otáčejícího se rotoru
$p$	počet pólových dvojic
$k_y$	činitel zkrácení kroku
$t_p$	pólová rozteč
$\beta$	zatěžovací úhel
$\Phi_1$	magnetický tok statoru
$\Phi_b$	magnetický tok budícího obvodu
$I_1$	proud, tekoucí v jedné fázi statoru
$I_b$	budící proud
$R_1$	ohmický odpor jedné fáze statoru
$X_r$	reaktance reakce kotvy
$X_\sigma$	rozptylová reaktance
$X_d$	synchronní reaktance
$U_v$	vnitřní napětí
$U_f$	fázové napětí na svorkách generátoru
$g$	redukční činitel
$Z_n$	jmenovitá impedance stroje
$U_{fn}$	jmenovité napětí synchronního stroje
$I_{1n}$	jmenovitý proud statoru
$I_{b0}$	budící proud naprázdno
$I_{k0}$	budící proud nakrátko
$\varphi$	fázový posun mezi napětím a proudem statoru
$\psi$	vnitřní fázový posuv mezi proudem statoru a elektromotorickou silou
$\varepsilon$	vnitřní fázový posuv mezi vnitřním napětím a fázovým napětím
$I_k$	proud nakrátko
$Z_d$	synchronní impedance
$\Delta U$	rozdíl napětí
$\Delta f$	rozdíl frekvence
$x_d''$	podélná rázová reaktance
$x_q''$	příčná rázová reaktance
$x_t$	reaktance transformátoru
$x_{ved}$	reaktance vedení
$x_v$	výsledná reaktance
$X_\Sigma$	celková reaktance soustavy při fázování
$\omega_s$	kmitočet sítě
$\omega_g$	kmitočet generátoru



$\alpha$	střední úhlový kmitočet s dvojnásobnou amplitudou
$\varphi_s$	fázový posun sítě
$\varphi_g$	fázový posun generátoru
$i_0''$	počáteční hodnota střídavého proudu
$i_{0m}''$	maximální hodnota počátečního střídavého proudu
$i_{s0}$	stejnoseměrná složka střídavého proudu
$i_{d0}''$	počáteční hodnota střídavého proudu v podélném směru
$i_{q0}''$	počáteční hodnota střídavého proudu v příčném směru
$i_{km}''$	maximální hodnota zkratového proudu
$i_k''$	střídavá složka zkratového proudu
$i_{sk}$	stejnoseměrná složka zkratového proudu
$\delta$	počáteční úhel při fázování s odchylkou fáze

## Seznam ilustrací

Obr. 1. Rotor hydroalternátoru [11] .....	2
Obr. 2. Rotor turboalternátoru [11] .....	3
Obr. 3. Náhradní schéma synchronního stroje pro jednu fázi .....	5
Obr. 4. Charakteristika provozních stavů synchronního stroje [8].....	7
Obr. 5. Fázorový diagram pro přebuzený turboalternátor .....	9
Obr. 6. Charakteristika naprázdno.....	10
Obr. 7. Charakteristiky nakrátko .....	11
Obr. 8. Fázorový diagram pro měření nakrátko [1] .....	11
Obr. 9. V-křivky .....	14
Obr. 10. Náhradní schéma fázování .....	16
Obr. 11. Schéma elektrizační soustavy .....	16
Obr. 12. Fázorový diagram pro fázování s chybou modulu napětí .....	18
Obr. 13. Fázorový diagram pro fázování s chybou fáze .....	19
Obr. 14. Náhradní schéma samosynchronizace.....	22
Obr. 15. Fázorový diagram samosynchronizace .....	22
Obr. 16. P,Q diagram .....	24
Obr. 17. Štítek generátoru .....	25
Obr. 19. Generátorické soustrojí .....	26
Obr. 18. Štítek motoru.....	26
Obr. 20. Panel UniGENu.....	27
Obr. 21. Třífázové zapojení UVR .....	28
Obr. 22. Měřicí stůl .....	29
Obr. 23. Sériové spojení odporu a indukčnosti .....	30
Obr. 24. Zatěžovací charakteristiky .....	30
Obr. 25. Schéma zapojení pro měření zatěžovacích charakteristik.....	31
Obr. 26 Graf zatěžovacích charakteristik .....	41

## Seznam tabulek

Tab. 1. Jednotlivé charakteristiky generátoru v ostrovním režimu .....	13
Tab. 2. Nastavené jmenovité hodnoty generátoru.....	38
Tab. 3. Naměřené hodnoty napětí a proudů statoru .....	38
Tab. 4. Nastavené jmenovité hodnoty generátoru.....	39
Tab. 5. Naměřené hodnoty napětí a proudů statoru .....	39
Tab. 6. Nastavené jmenovité hodnoty generátoru.....	40
Tab. 7. Naměřené hodnoty napětí a proudů statoru .....	40

## Úvod

Synchronní stroje můžeme provozovat buď jako generátory, nebo jako motory podle toho, zda elektrickou energii dodáváme nebo odebíráme ze sítě. Nejčastěji se používají k výrobě třífázového elektrického proudu ve větších výrobních jednotkách, pracují tedy jako synchronní generátory (alternátory). Vyrábějí se pro vysoké výkony, až 2000 MW. To z nich činí největší elektrické stroje točivé. V elektrárnách jsou synchronní generátory poháněny parními turbínami a nazývají se turboalternátory, ty dosahují obvodové rychlosti až 3000 ot/min, nebo je pohánějí vodní turbíny s obvodovou rychlostí mezi 68 až 500 ot/min.

Alternátory jsou zdrojem jak činné, tak jalové energie. Speciální synchronní stroj, který dodává do sítě pouze jalovou energii, se nazývá synchronní kompenzátor. Synchronní generátory pak můžeme provozovat v ostrovním režimu, tj. samostatně pracující, a nebo paralelně připojené na tvrdou síť.

Práce je strukturována do čtyř kapitol. První kapitola popisuje princip točivého stroje. V druhé kapitole jsou popsány konstrukční prvky synchronního stroje s hladkým rotorem. Třetí kapitola uvádí základní charakteristiky a provozní stavy synchronního generátoru a v poslední části je samotné vypracování praktických úloh za použití řídicího systému UniGEN.

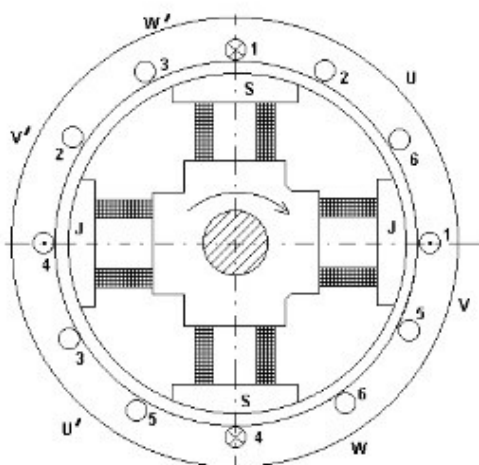
## 1 Synchronní stroje

### 1.1 Konstrukční uspořádání:

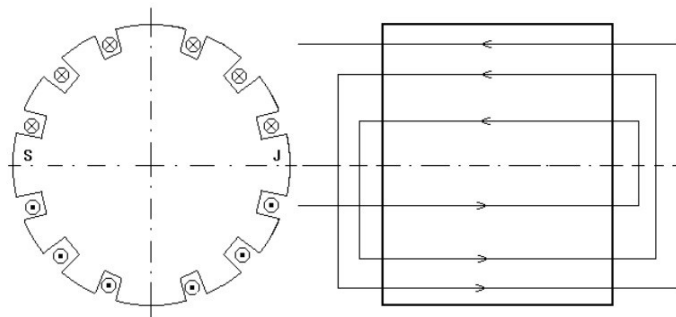
Synchronní stroj se stejně jako ostatní točivé stroje skládá ze dvou hlavních částí - rotor a stator. Statorem se neliší od stroje asynchronního. Magnetický obvod statoru je tvořen tenkými izolovanými plechy, na jejichž vnitřním obvodu jsou vyfrézovány drážky, do kterých je vloženo třífázové vinutí. Stroje na vysoké napětí (6 kV - 35 kV) musí mít kvůli velkému mechanickému namáhání pevné vývody a zajištěné účinné chlazení, neboť u strojů velkých výkonů vzniká velké oteplení na jednotku objemu, které už nelze odvézt do prostředí.

Podle provedení rotoru dělíme synchronní stroje na dva typy:

- s vyniklými póly (hydrogenerátor)
- s hladkým rotorem (turbogenerátor)



Obr. 1. Rotor hydroalternátoru [11]



Obr. 2. Rotor turboalternátoru [11]

Na Obr. 1 je znázorněn stroj s vyniklými póly. Rotor má  $2p = 4$ . Stroje s vyniklými póly jsou zpravidla pomaloběžné s velkým počtem pólových dvojic, velkým průměrem a malou délkou (průměr je zpravidla větší než délka). Součástí rotoru je tzv. magnetové kolo, na kterém jsou upevněny póly s pólovými nástavci. Budící vinutí je uloženo na jádrech pólů. Hydrogenerátor je taky vybaven tlumícím vinutím (amortizérem), které je umístěno v osových drážkách na pólových nástavcích. Když se z jakéhokoliv důvodu změní moment stroje, tak se stroj nachází v přechodném stavu, kdy kolísají otáčky a rotor se vychyluje ze své rovnovážné polohy vůči statoru. V tlumícím vinutí se naindukují tlumicí proudy, které vytvoří protimoment a ten způsobí, že si rotor vytvoří novou rovnovážnou polohu vůči ose statoru, která je odlišná od původní polohy[4].

Obr. 2 představuje dvupólový synchronní stroj s hladkým rotorem. Vzhledem k velkým obvodovým rychlostem jsou rotory tvořené z celistvé oceli s velkou pevností. Budící vinutí je umístěno v drážkách na obvodu válce rotoru. Drážky tvoří dvě třetiny povrchu válce, zbytek rotoru je bez drážek a prochází jím magnetický tok. Vinutí je proti odstředivým silám upevněno kovovými klíny, které navíc slouží jako tlumicí vinutí. Hladký rotor má po celém svém obvodu relativně konstantní vzduchovou mezeru, což má za následek lichoběžníkový průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře[1].

Rotor synchronního stroje obvykle není složen z plechů, protože pole rotoru se točí synchronně s polem statoru a tudíž se v něm nevznikají ztráty v železe. Vzduchová mezera je větší než u asynchronních strojů. Protože synchronní stroje mohou jalovou energii do sítě dodávat, není velikost vzduchové mezery tímto faktorem ovlivněna.

## 1.2 Princip synchronního stroje:

Budící rotorové vinutí synchronního generátoru je napájeno stejnosměrným proudem, které vytvoří stacionární magnetické pole. Buzeným rotorem se otáčí pomocí poháněcího zařízení, kterým je obvykle turbína. Tento otáčivý pohyb způsobí relativní prostorovou změnu magnetického pole vůči vinutí kotvy (statoru), díky které se do jedné fáze třífázového vinutí statoru bude indukovat napětí

$$U_i = B \cdot l \cdot v \quad (1.1)$$

s frekvencí

$$f_1 = \frac{p \cdot n_1}{60} \quad (1.2)$$

Jednotlivé fáze jsou od sebe pootočený o  $120^\circ$ . Aby se do vinutí statoru indukovalo harmonické napětí sinusového průběhu, musí mít rovněž magnetická indukce ve vzduchové mezeře sinusový průběh. To se dá částečně ovlivnit správnou volbou pólového nastavce. Průběh magnetické indukce se ale poněkud liší od sinusovky a indukuje do vinutí statoru kromě základní harmonické taky napětí vyšších harmonických. Zkrácením kroku  $\beta = 0,8$  pólové rozteče se zcela potlačí vliv 5. harmonické [8].

činitel zkrácení kroku

$$k_y = \sin \cdot \left( \frac{y}{t_p} \cdot \frac{\pi}{2} \right) = \sin \beta \quad (1.3)$$

kde

$$\left( \frac{y}{t_p} \cdot \frac{\pi}{2} \right) = \beta \quad (1.4)$$

Mimo to se vinutí třífázových strojů spojují do hvězdy, protože pak sdružená napětí neobsahují 3. harmonickou a její násobky. U strojů s hladkým rotorem je velký počet drážek na pól, což má za následek průběh, který se blíží sinusovému průběhu.

Při souměrném zatížení vytvoří stator svoje točivé pole, které se otáčí stejnou rychlostí jako pole rotoru, resp. rotor.

### 1.3 Reakce kotvy

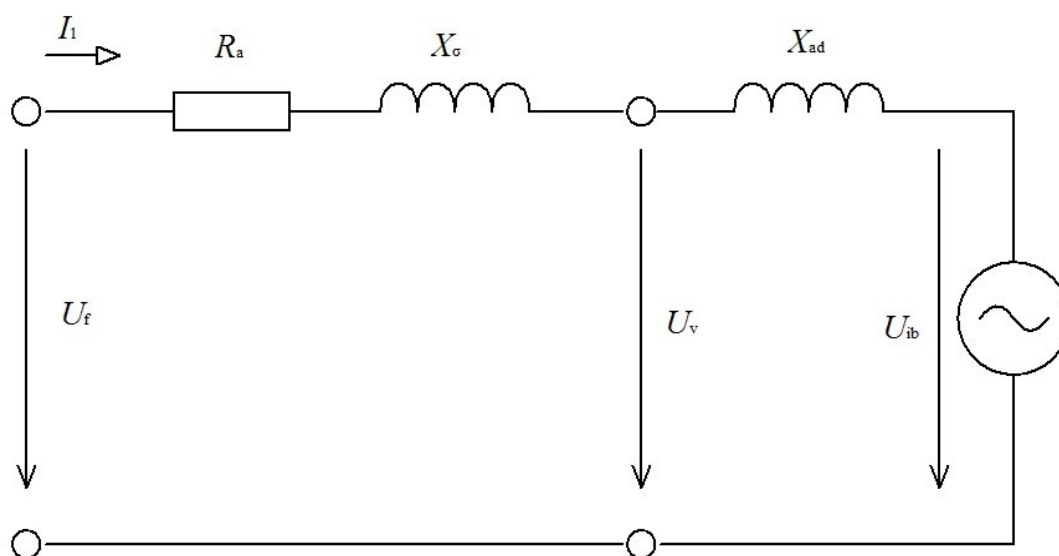
Kotvou máme na mysli tu část stroje, kde se indukuje napětí. U synchronního generátoru je kotva stator.

Když je stator zatížen, to znamená, pokud jím teče proud, vyvolá ve třífázovém vinutí své točivé magnetické pole, které se superponuje s polem rotoru ve výsledný magnetický tok. Tomuhle poli pak říkáme pole reakce kotvy. Označíme ho  $\Phi_1$ . S tímto tokem je ve fázi statorový proud  $I_1$ . Pak můžeme konstatovat, že pole reakce kotvy se buď může přičítat, nebo odečítat od budícího toku  $\Phi_b$ . Velikost  $\Phi_1$  závisí na velikosti statorového proudu a natočení na zátěžném úhlu  $\beta$ . Pro čistě induktivní charakter zátěže se musí generátor chovat jako kondenzátor, protože musí dodat potřebný jalový výkon. Ve

fázorovém diagramu se to promítne tak, že satorový proud bude předbíhat napětí  $U_{ib}$  o  $\pi/2$ . Když se zanedbá činný odpor vinutí a rozptylový tok, tak je výsledné napětí menší o úbytek na reaktanci reakce kotvy. Říkáme, že takovýto stroj odbuzuje. Při kapacitní zátěži je výsledné napětí naopak větší než napětí  $U_{ib}$ . Tento stroj na druhou stranu přibuzuje [8].

#### 1.4 Náhradní schéma

Na Obr. 3 je náhradní schéma jedné fáze synchronního stroje s hladkým rotorem. Synchronní stroj se chová jako napěťový zdroj s napětím  $U_{ib}$ , které lze měnit napětím a otáčkami. Je připojen přes reaktanci reakce kotvy, rozptylovou reaktanci a činný odpor vinutí. Obrázek můžeme překreslit s proudovým zdrojem a tím zohlednit i ztráty v železe.



Obr. 3. Náhradní schéma synchronního stroje pro jednu fázi

$U_{ib}$  indukované napětí v kotvě působením otáčejícího se rotoru

$U_v$  vnitřní indukované napětí na kotvě

$U_b$  svorkové napětí statoru

$X_\sigma$  rozptylová reaktance kotvy

$X_{ad}$  reaktance respektující reakci kotvy (podélná synchronní reaktance)

$R_a$  činný odpor jedné fáze statorového vinutí



$I_1$  proud kotvy

$X_d = X_\sigma + X_{ad}$  synchronní reaktance

Jednotlivé prvky nakreslené v náhradním schématu se vyjadřují obvykle v procentech jmenovité impedance. Jmenovitá impedance je dána podílem fázového napětí na svorkách zdroje k jmenovitému statorovému proudu.

$$Z_n = \frac{U_{fn}}{I_{1n}} \quad (1.5)$$

Velikost prvků vzhledem k jmenovité impedanci:

$$R_a = 1 - 5 \% Z_n$$

$$X_\sigma = 15 - 30 \% Z_n$$

$$X_{ad} 100 - 200 \% Z_n$$

Z náhradního schématu zjistíme velikost svorkového napětí

$$U_f = U_i + R_a \cdot I_1 + jX_\sigma \cdot I_1 \quad (1.6)$$

$$U_i = U_{ib} + jX_{ad} \cdot I_1 \quad (1.7)$$

Ze vztahů (1.6) vyplývá, že svorkové napětí se dá měnit změnou zatížení, čili proudem kotvy, anebo změnou fiktivního vnitřního napětí, čemuž odpovídá regulace budícího proudu v budícím vinutí.

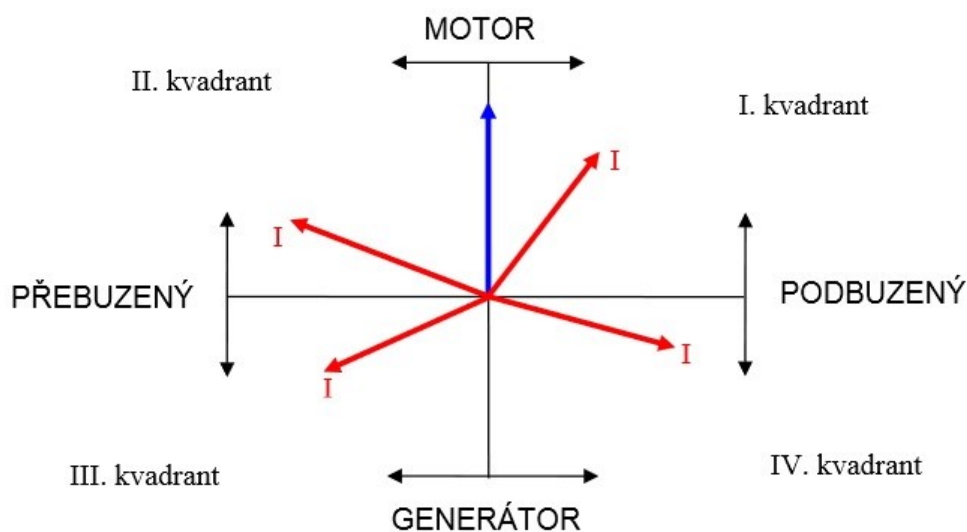
Kvůli zjednodušení některých výpočtů se občas používá zjednodušené náhradní schéma. Zjednodušení spočívá v tom, že nebereme v potaz činný odpor. Z hlediska poměru vůči jmenovité impedanci jej můžeme zanedbat. Reaktance se pak sečtou ve výslednou synchronní reaktanci  $X_d$ . Toto lze použít pouze v případech, kdy je synchronní reaktance konstantní, tedy jen v ustálených stavech a neprobíhají žádné velké skoky zatížení, apod.

## 2 Provozní stavy synchronního stroje:

Obecně bychom mohli všechny provozní stavy shrnout do tří základních typů:

- provoz v přebuzeném a podbuzeném stavu
- asynchronní chod
- chod s nesouměrným zatížením

Alternátory se provozují převážně podle prvního stavu. Ostatní dva stavy jsou mimořádné. Kromě těchto stavů existuje ještě spousta dalších. Podle toho, jestli se rozhodneme dodávat nebo odebírat elektrickou energii, rozdělujeme stroje na generátory a motory, a pokud dodává pouze jalovou energii, tak se jedná o synchronní kompenzátor. V našem případě se zaměříme pouze na generátory. Ty se pak mohou podílet na výrobě dodávkou elektřiny do distribuční sítě, nebo mohou pracovat samostatně v ostrovním režimu jako zdroje elektrické energie v nepřístupných místech [2].



- I. kvadrant – podbuzený motor – odebírá ze sítě činný výkon a indukční jalový výkon
- II. kvadrant – přebuzený motor - odebírá ze sítě činný výkon a kapacitní jalový výkon
- III. kvadrant – přebuzený generátor – dodává do sítě činný i jalový výkon
- IV. kvadrant – podbuzený generátor – dodává do sítě činný výkon a odebírá ze sítě indukční jalový výkon – vyjímecný provozní stav alternátoru

Obr. 4. Charakteristika provozních stavů synchronního stroje [8]

Abychom lépe pochopili, jak tyto stavy fungují, tak si musíme stanovit několik zásad pro kreslení fázorových diagramů pro tyto stavy:

- fázor svorkového napětí budeme kreslit vždy do osy y
- činné složky budeme kreslit do osy y a jalové do osy x
- pokud energii ze sítě odebíráme, pak bude ležet v kladné polorovině
- pokud energii odebíráme, pak bude ležet v záporné polorovině
- přebuzený stroj dodává energii do sítě ( $I_b > I_{b0}$ ) a podbuzený energii odebírá ( $I_b < I_{b0}$ )

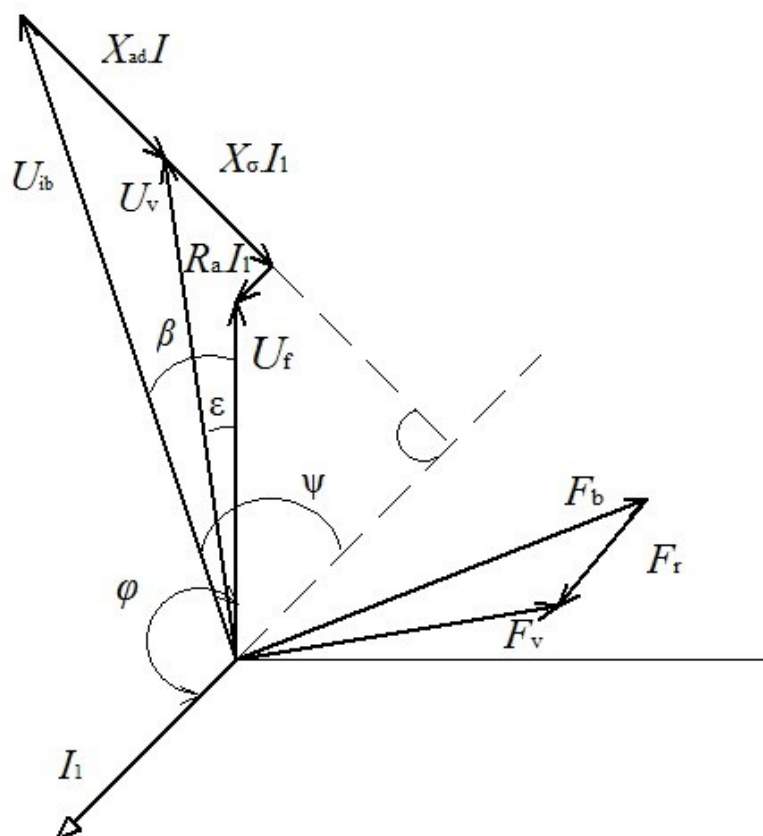
Podle dvou krajních stavů stroje se dále určují důležité veličiny stroje a mimo jiné i další charakteristiky. Tyto dva stavy jsou naprázdno a nakrátko, ze kterých se např. zjistí proudy  $I_{b0}$  a  $I_{k0}$ , které jsou potřebné pro vybudení jmenovitého napětí stroje. Jejich podílem získáme tzv. redukční činitel  $g$  [5]

$$g = \frac{I_{b0}}{I_{k0}} \quad (2.1)$$

díky němuž můžeme přepočítávat statorový proud na stranu rotoru nebo naopak.

V síti dominují převážně

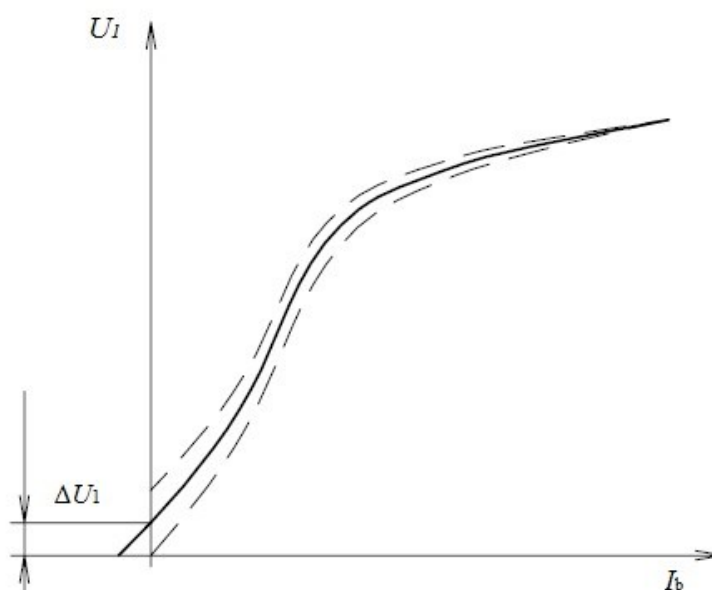
elektrické motory a transformátory, které se k ní chovají jako induktivní zátěž, proto se nejčastěji používá přebuzeného alternátoru, jenž kompenzuje jalovou energii. Kromě toho má i jiné výhody oproti provozování alternátoru v podbuzeném stavu. Podbuzený alternátor má omezenější pracovní oblast. na Obr. 5. je přebuzený synchronní generátor.



Obr. 5. Fázorový diagram pro přebuzený turboalternátor

## 2.1 Charakteristika naprázdno:

Charakteristika naprázdno je závislost sdruženého svorkového napětí  $U_1$  generátoru na buzení  $I_b$  při  $n = \text{konst.}$  a  $I = 0$ . Indukované napětí zde předbíhá magnetický tok o  $90^\circ$  obdobně, jako u transformátoru. Charakteristika vyjadřuje magnetické vlastnosti, jelikož je napětí silně závislé na buzení, a to zejména v oblasti kolena. Charakteristika naprázdno se zjišťuje měřením z Obr. 6.

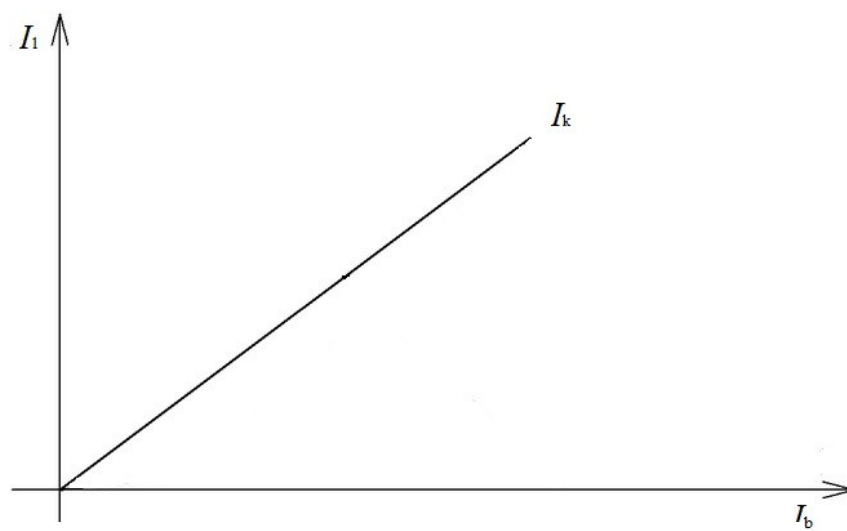


Obr. 6. Charakteristika naprázdno

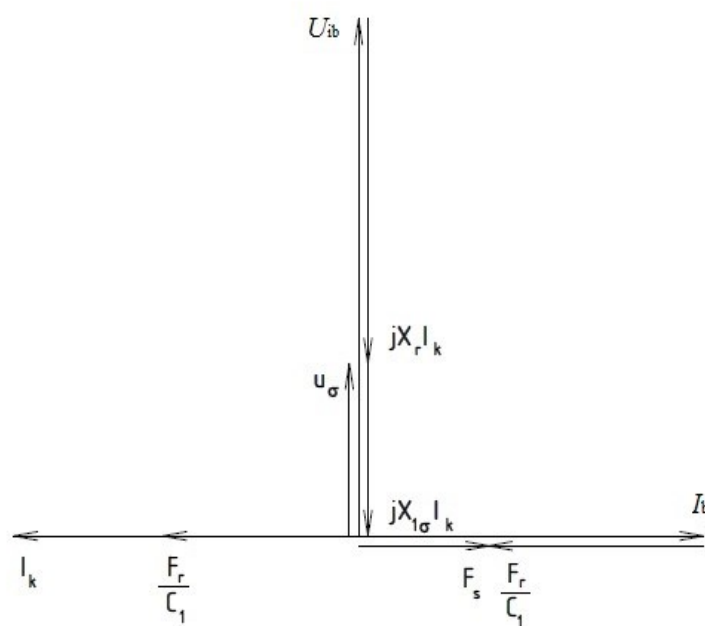
Budící proud nejprve zvyšuje z nuly, až do hodnoty, při které je  $U_1 = 1,2U_n$ . Následně proud snižujeme zpátky na nulu. Výsledkem je hysterezní křivka. Střední čára pak udává charakteristiku naprázdno, jejíž průsečík s osou napětí určuje hodnotu zbytkového remanentního napětí  $\Delta U_1$ . Kdybychom od této hodnoty sestrojili tečnu s charakteristikou naprázdno, dostali bychom průběh vzduchové mezery. Charakteristika naprázdno je zhruba totožná s charakteristikou vzduchové mezery v rozsahu 0 - 50%  $U_n$ , potom již je magnetické jádro přesycené a proud v obvodu rychle roste.

## 2.2 Charakteristika nakrátko:

Při stavu nakrátko se měří proud v každé fázi statoru, které jsou spojeny nakrátko a proud, který teče v budícím vinutí při  $n = \text{konst}$  a  $U_1 = 0$ . Při měření se musí dbát na to, aby celková zkouška trvala co nejkratší dobu, z důvodu velkého oteplení vodičů. Proto by mělo měření ještě navíc probíhat od největší hodnoty až po nulu, tedy  $I_1 = 1,2 - 0I_n$ . Teoreticky stačí změřit pouze jednu hodnotu charakteristiky, protože ve stavu nakrátko je sycení magnetického obvodu velmi malé a charakteristika je ve výsledku přímková. Při spojení všech tří fází nakrátko je potřeba většího budícího proudu  $I_b$  k vybuzení jmenovitého proudu statoru  $I_{1n}$ . Charakteristika nakrátko je na Obr. 7 [4].



Obr. 7. Charakteristiky nakrátko



Obr. 8. Fázorový diagram pro měření nakrátko [1]

Z Kirchhoffova zákona můžeme určit, čemu se rovná proud nakrátko.

Pro  $U_1 = 0$  V platí

$$U_{ib} + Z_d I_k = 0 \quad (2.2)$$

$$I_k = -\frac{U_{ib}}{Z_d} \quad (2.3)$$

kde  $Z_d$  je podélná synchronní impedance.

Vzhledem k dříve zmíněnému faktu, že činný odpor vinutí statoru  $R$  je o hodně menší než synchronní reaktance  $X_d$ , budeme ho v dalších úvahách zanedbávat.

Tedy podle rovnice (2.2) platí

$$I_k = j \frac{U_{ib}}{X_d} \quad (2.4)$$

### 2.3 Samostatně pracující synchronní stroj:

Synchronní generátor, pracující samostatně, nebo též v ostrovním režimu se používá pro napájení komplexu umístěných v nepřístupných oblastech. Jako pohon pro synchronní generátor v ostrovním režimu se nejčastěji využívá spalovací motor.

Jelikož generátor nedodává energii do rozsáhlé elektrizační sítě, ale do své vlastní, pak při náhle změně činného nebo jalového výkonu dojde ke změně svorkového napětí generátoru a jiných charakteristických veličin.

Charakteristické veličiny:  $U_f, I_1, \cos\varphi, P, U_b, I_b$

Kombinací změn charakteristických veličin můžeme sestavit potřebné charakteristiky synchronního stroje, které jsou důležité pro zjišťování konkrétních vlastností generátoru [4].

Tab. 1. Jednotlivé charakteristiky generátoru v ostrovním režimu

Charakteristika	Veličina				
	$U_f$	$I_1$	$I_b$	$\cos\varphi$	$P$
Naprázdko $Z = \infty$	x	0	x	-	0
Nakrátko $Z = 0$	0	x	x	-	0
Indukční	x	konst.	x	0/ konst.	0/ $\approx U$
Zatěžovací (vnější)	x	x	konst.	konst.	$\approx UI$
Řídicí (regulační)	konst.	x	x	konst.	$\approx I$

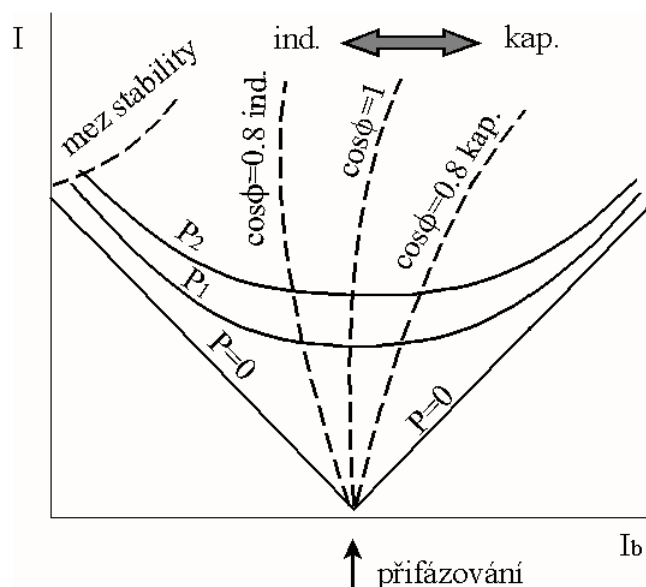
kde x v tabulce značí proměnnou.

#### 2.4 Paralelně pracující se sítí:

Jestliže elektrická síť není schopná dodat potřebný výkon, připojí se k ní paralelně synchronní generátor. Musíme zajistit, aby byly před jeho spuštěním splněny podmínky pro paralelní chod, tzn. provézt fázování. Ve srovnání se sítí dodává generátor výkon několikanásobně menší, to znamená, že tato změna nezpůsobí žádné nebo jen nepatrné poklesy napětí. Proto ji charakterizujeme s konstantním napětím a kmitočtem [1].

Tuto skutečnost přesně prezentuje charakteristika zvaná V-křivky. Říká se jí tak proto, že pro  $P = 0$  je tvořena dvěma přímkami, spojenými do tvaru písmena V viz Obr. 9.





Obr. 9. V-křivky

Udává závislost satorového proudu  $I_1$  na budícím proudu  $I_b$  při konstantním výkonu a napětí sítě. Takhle se dají změřit jednotlivé charakteristiky pro každý výkon zvlášť. Nejnižší bod charakteristiky je pro  $\cos\varphi = 1$ , to znamená pro čistě ohmickou zátěž. Při zvětšování zatížení je potřeba, aby generátor dodával větší budící proud v přebuzeném stavu a nižší budící proud pro podbuzený stav. Když je budící proud roven nule, magnetické pole je buzeno jalovým proudem [4].

## 2.5 Fázování:

je to proces, při kterém se generátor připojí k síti, nebo jinému generátoru paralelně. Přitom musíme omezit proudový a momentový ráz, které vznikají v okamžiku sepnutí. Při nesynchronním přifázování do sítě může být proudový náraz až 2x větší než proud vyvolaný při zkratu na svorkách alternátoru. Je to velmi nebezpečný stav, protože alternátory jsou dimenzovány pouze na dynamické a tepelné účinky zkratového proudu. Proto je nutná kvalifikovanost obsluhy. Fázování můžeme provádět dvěma způsoby, které se od sebe značně liší. Nejlepším a nejužívanějším způsobem je přesné fázování, při kterém nedochází k proudovým a momentovým rázům. Druhý způsobem je asynchronní fázování (samosynchronizace), které se používá hlavně při havarijních stavech. Tyto dva způsoby si v následujících kapitolách rozebereme konkrétněji [6].

### 2.5.1 Přesné fázování:

U ideálního přifázování generátoru k síti, popřípadě k jinému generátoru nedochází k žádným proudovým, ani momentovým rázům. Pro tento způsob fázování musíme splnit určité podmínky:

- stejný sled fází generátoru a sítě
- stejný úhlový kmitočet
- stejný modul napětí (amplituda)
- okamžitá hodnota musí být stejná v každém okamžiku, to znamená, že fáze musí mít nulový fázový posun

V elektrárnách se tolerují malé nepřesnosti některých zmíněných podmínek, výjimkou je sled fází. Podle pravidel pro paralelní provoz zdrojů se sítě provozovatele distribuční soustavy mohou být nepřesnosti takové [7]:

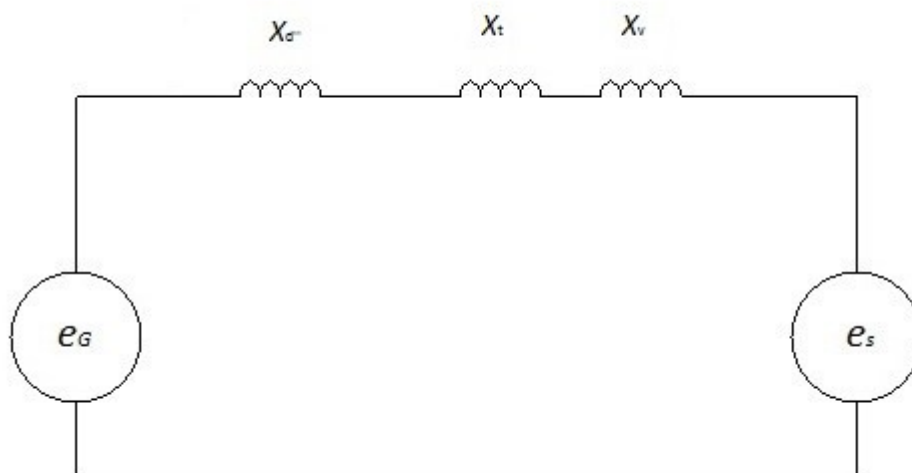
- rozdíl napětí  $\Delta U < \pm 10\% U_n$
- rozdíl frekvence  $\Delta f < \pm 0,5 \text{ Hz}$
- rozdíl fáze  $< \pm 10$

Elektrické schéma pro fázování generátoru k síti je na obr. 4. Při tom se připouští několik zjednodušení:

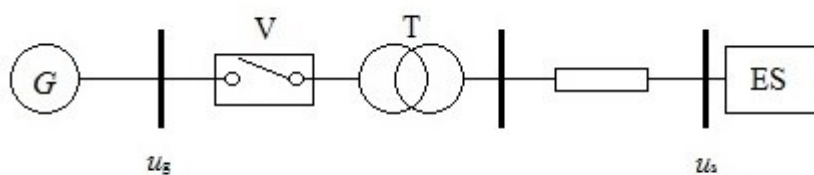
- Síť, do které alternátor dodává elektrickou energii, je výkonově neomezená, takže všechny její náhradní reaktance můžeme zanedbat. Během přechodného děje platí  $u_s = \text{konst.}$
- Podélná rázová reaktance  $x_d''$  je rovna příčné rázové reaktanci  $x_q''$ .
- Před přifázováním byl generátor ve stavu naprázdno, proto nevzniká úbytek na rozptylové reaktanci ani na reaktanci reakce kotvy. Vnitřní napětí je rovno napětí na svorkách generátoru.
- Zanedbávají se všechny rezistance.

Generátor je reprezentován tvrdým zdrojem napětí  $u_G$  s předřazenou rázovou reaktancí (druhou přechodovou reaktancí)  $X_d''$ . Obdobně je i síť ve schématu znázorněná zdrojem napětí. V systému se uplatní taky reaktance vedení  $X_v$ , popřípadě reaktance blokového transformátoru  $X_t$ . Sériovým spojením reaktancí generátoru a systému vznikne reaktance omezující počáteční rázový proud.

$$X_\Sigma = X_d'' + X_t + X_{ved} \quad (2.5)$$



Obr. 10. Náhradní schéma fázování



Obr. 11. Schéma elektrizační soustavy

Počáteční rázový proud má obecně střídavou a stejnosměrnou složku, které se vektorově sčítají. Výsledný průběh je pak dán obalovou křivkou proudu. V našem případě nebudeme nad stejnosměrnou složkou uvažovat .

Počáteční střídavá složka proudu je dána vztahem:

$$\overline{i''_0} = \frac{\overline{u_G} - \overline{u_S}}{jX_\Sigma} \quad (2.6)$$

Stejná amplituda se kontroluje pomocí voltmetrů připojených na napětí generátoru a napětí sítě. Napětí generátoru se reguluje na napětí sítě pomocí buzení. Rozdíl amplitud obou napětí způsobí náraz jalového proudu.

Při fázovém posunu napětí generátoru a sítě vzniká další proudový náraz, způsobený rozdílem napětí. Při malých úhlech je rázový proud převážně činného charakteru, naopak při úhlech větších je proudový náraz jalového charakteru.

Jestliže se nedodrží podmínka stejného sledu fází, tak nastává situace, kdy indukované třífázové magnetické pole v kotevním vinutí generátoru se točí jiným směrem, než točivé pole elektrizační sítě. Tahle skutečnost vede k tomu, že v celém stroji se bude indukovat dvojnásobná elektromotorická síla, což vede k výpadku generátoru. Stejný sled fází se jednoduše zkontroluje asynchronním motorkem, který se musí po zapojení na stejné fáze točit v témže smyslu jako generátor.

Rozdíl kmitočtu sítě a generátoru by měl být co nejmenší (maximálně 0,5 Hz), jinak dojde k nárazu činného charakteru. V podstatě mohou nastat dva případy. Rotor připojovaného generátoru má větší úhlovou rychlost, než rotory již připojených generátorů. V tom případě má připojovaný generátor nadbytek kinetické energie, která se přelévá do sítě a mění se tak na energii elektrickou. Tímto způsobem se rotor brzdí až na otáčky ostatních generátorů, v důsledku čehož je namáhána turbína a samotný generátor. Když je rotor připojovaného generátoru naopak pomalejší než rotory ostatních generátorů, musí mu síť dodat požadovanou kinetickou energii. V praxi se fázování alternátoru provádí spíše při vyšších otáčkách alternátoru, než jsou synchronní otáčky sítě.

Pokud se liší kmitočty, tak vzniká rozdíl okamžitých napětí  $u_s$  a  $u_G$  při stejné fázi a amplitudě.

platí

$$\Delta u = u_s - u_G = U_{ms} \cdot \sin(\omega_s \cdot t + \varphi_s) - U_{mG} \cdot \sin(\omega_G \cdot t + \varphi_G) \quad (2.7)$$

kde

$\omega_s$  - úhlový kmitočet sítě

$\omega_G$  - úhlový kmitočet generátoru

podle goniometrických funkcí jde vztah dále upravit

$$\Delta u = 2 \cdot U_m \cdot \cos\left(\frac{\omega_s + \omega_G}{2}\right) \cdot t \cdot \sin\left(\frac{\omega_s - \omega_G}{2}\right) \cdot t \quad (2.8)$$

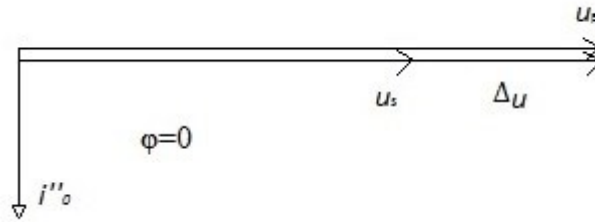
$$\Delta u = 2 \cdot U_m \cdot \cos \alpha t \cdot \sin \gamma t \quad (2.9)$$

výsledné napětí kmitá středním úhlovým kmitočtem  $\alpha$  s dvojnásobnou amplitudou.

Nyní rozebereme dva speciální případy. Následující odvození vychází z publikací [2] a [3]:

#### a) Rozdílný modul napětí generátoru a sítě, stejný fázový posun

Fázory napětí generátoru a sítě jsou ve fázi, liší se pouze svoji velikostí. Tuto skutečnost představuje Obr. 12.



Obr. 12. Fázorový diagram pro fázování s chybou modulu napětí

Pokud jsou obě napětí položeny do reálné osy, pak pro počáteční rázový proud platí

$$i''_0 = \frac{u_g - u_s}{j(x''_d + x_v)} = j \frac{u_s - u_g}{x''_d + x_v} \quad (2.10)$$

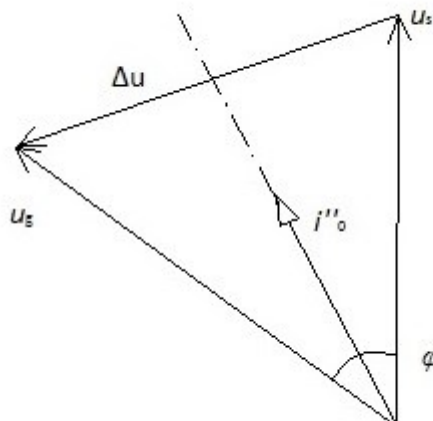
Proud je posunut o  $90^\circ$  oproti napětím, tedy v ose imaginární a z toho vyplývá, že náraz bude čistě jalového charakteru. Když bude  $u_g > u_s$ , pak proud bude v záporné polovině imaginární osy. To znamená, že proudový náraz bude induktivní. Jestliže je  $u_s > u_g$ , pak je tomu naopak a náraz je kapacitní. Ve většině případu je ráz induktivní. Napětí generátoru se reguluje na vyšší napětí z důvodu, aby ihned po přifázování dodával do sítě jalový výkon induktivního charakteru. V praxi je dovolena chyba napětí v poměrných jednotkách  $\Delta u = 0,1$  a rázová reaktance bývá 0,15 až 0,3. Pokud uvedeme nejhorší případ, kdy  $x_{ved} = 0$  a  $x''_d = 0,15$ , pak je počáteční hodnota proudu podle ...

$$i''_0 = \frac{\Delta u}{x''_d} = \frac{0,1}{0,15} = \frac{2}{3} I_n \quad (2.11)$$

Což generátor nemůže jakkoliv proudově ani mechanicky namáhat. V tom případě je tento způsob fázování vhodný pro praktické účely.

#### b) Stejný modul napětí generátoru a sítě, ale rozdílný fázový posun

V tomto případě jsou napětí generátoru a sítě co do velikosti stejné, avšak počáteční úhel  $\delta$  je nenulový. Proudovou rovnici znovu sestavíme z fázorového diagramu, který je na Obr. 13.



Obr. 13. Fázorový diagram pro fázování s chybou fáze

Počáteční složka střídavého proudu je ve tvaru

$$i''_0 = \frac{u_g - u_s}{j(x''_d + x_v)} = \frac{u_g \cdot (1 - e^{-j\delta})}{j(x''_d + x_v)} \quad (2.12)$$

kde

$$e^{-j\delta} = \cos\delta - j \cdot \sin\delta \quad (2.13)$$

a dále matematickými úpravami

$$i''_0 = \frac{u_g \cdot (1 - \cos\delta + j \cdot \sin\delta)}{j(x''_d + x_v)} = \frac{-j \cdot u_g + j \cdot u_g \cdot \cos\delta + u_g \cdot \sin\delta}{x''_d + x_v} \quad (2.14)$$

$$i''_0 = \frac{u_g \cdot (\sin\delta + j(\cos\delta - 1))}{x''_d + x_v} \quad (2.15)$$

Když opět položíme fázor napětí generátoru do reálné osy, pak můžeme upravit vztah (2.15) do tvaru

$$i''_0 = \frac{u_g \cdot 2\sin\frac{\delta}{2}}{x''_d + x_v} \cdot \left(\cos\frac{\delta}{2} - j \cdot \sin\frac{\delta}{2}\right) \quad (2.16)$$

a pro velikost počáteční hodnoty střídavého proudu platí rovnice

$$|i_0''| = \frac{2 \cdot u_g}{x_d'' + x_v} \cdot \sin \frac{\delta}{2} \quad (2.17)$$

Ze vztahu (2.16) vyplývá, že pro malé úhly  $\delta$  převládá složka činná, teprve od úhlu  $\delta = \frac{\pi}{2}$  se uplatňuje více jalová složka proudu. Když jsou obě napětí v protifázi, pak se rovnice zredukuje do tvaru

$$|i_0''| = \frac{2 \cdot u_g}{x_d'' + x_v} \quad (2.18)$$

Proud je nyní ryze jalový a dosahuje nejvyšší možné hodnoty při tomto způsobu fázování. Předpokládejme, že  $u_g = u_n = 1$ ,  $x_d'' = 0,15$  a  $x_v = 0$ , absolutní hodnota počátečního střídavého proudu je

$$|i_0''| = \frac{2}{0,15} = 13,33 \cdot I_n \quad (2.19)$$

Taková hodnota proudu je pro generátor zvlášť nebezpečná. Na druhou stranu, když fázujeme generátor s malým úhlem  $\delta$ , je velice pravděpodobné, že činný výkon způsobí urychlování rotujících hmot stroje a tím i přídavné momentové rázy. Skutečnost je tedy taková, že když použijeme metodu fázování s odchylkou fáze, narazíme na větší problémy vznikající s většími proudovými i momentovými nárazy.

Jak již bylo řečeno k úvodu do fázování, tenhle proces si vyžaduje vysoce kvalifikovanou obsluhu, jelikož při nesynchronním sepnutí stroje vznikají obrovské proudy, převyšující proudy zkratové. Generátory jsou však dimenzovány pouze na silové účinky zkratových proudů a proto zde uvedeme odvození poměru zkratového proudu a proudu, který vzniká při fázování.

Na počátku přifázování má proud složku střídavou a stejnosměrnou, která se podle obalové křivky ustálí až na nulové hodnotě. Proud s těmi složkami si označíme

$$i_{om}'' = \sqrt{2} \cdot i_0'' + i_{so} = \sqrt{2} \cdot i_0'' + \sqrt{2} \cdot i_0'' = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot i_0'' \quad (2.20)$$

kde  $i_{so}$  je počáteční hodnota stejnosměrné složky. Obdobně vyjádříme i hodnotu nárazového zkratového proudu.

$$i''_{km} = \sqrt{2} \cdot i''_k + i_{sk} = \sqrt{2} \cdot i''_k + \sqrt{2} \cdot i''_k = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot i''_k \quad (2.21)$$

Za podmínky  $|u_g| = |u_s| = u_n = 1$ , můžeme zapsat maximální hodnoty obou proudů

$$|i''_{0m}| = \frac{2 \cdot \sin \frac{\delta}{2}}{x''_d + x_v} \quad (2.22)$$

$$i''_{km} = \frac{1}{x''_d} \quad (2.23)$$

Výše zmíněný poměr je pak

$$\frac{i''_{0m}}{i''_{km}} = \frac{x''_d \cdot 2 \cdot \sin \frac{\delta}{2}}{x''_d + x_v} = \frac{2 \cdot \sin \frac{\delta}{2}}{1 + \frac{x_v}{x''_d}} \quad (2.24)$$

opět dosadíme  $x_v = 0$  a dostaneme vztah

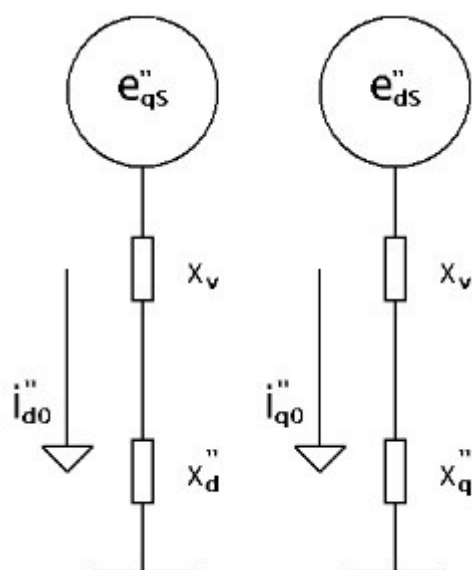
$$\frac{i''_{0m}}{i''_{km}} = 2 \cdot \sin \frac{\delta}{2} \quad (2.25)$$

proudy se rovnají, když do vztahu (2.25) dosadíme za úhel  $\delta = \frac{\pi}{3}$ . Pro úhel  $\delta = \pi$  je fázovací proud dvakrát větší, než proud zkratový.

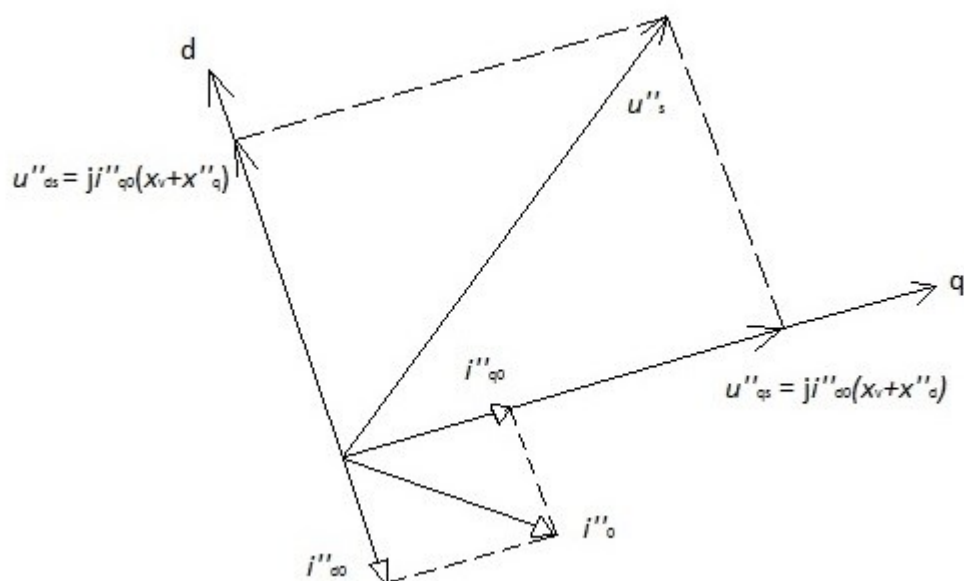
### 2.5.2 Samosynchronizace:

Při samosynchronizaci se nenabuzený stroj roztočí pomocným pohonem na téměř synchronní otáčky (cca. 95%), následně se připojí na síť a okamžitě nabudí. Tímto se generátor vtáhne do synchronismu pomocí synchronizačního momentu. Nevýhodou samosynchronizace je, že při okamžiku připojení generátoru vzniká velký proudový náraz jalového charakteru. Počáteční hodnota proudu je omezena pouze rázovou reaktancí  $X''_d$ ,  $X''_q$  a případně vnější reaktancí  $X_v = X_t + X_{ved}$ . Velikost proudu plyne z fázorového diagramu nakresleného podle náhradního schématu. Následné odvození vychází z Obr. 15.





Obr. 14. Náhradní schéma samosynchronizace



Obr. 15. Fázorový diagram samosynchronizace

pro složky napětí v podélném a příčném směru platí

$$u''_{ds} = j \cdot i''_{q0} \cdot (x_v + x''_q) \quad (2.26)$$

$$u''_{qs} = j \cdot i''_{d0} \cdot (x_v + x''_d) \quad (2.27)$$

následně podle Pythagorovi věty

$$i''_0 = \sqrt{|i''_{d0}|^2 + |i''_{q0}|^2} = \sqrt{\frac{|u''_{qs}|^2}{(x_v + x''_d)^2} + \frac{|u''_{ds}|^2}{(x_v + x''_q)^2}} \quad (2.28)$$

Pokud zanedbáme magnetickou nesymetrii ve vzduchové mezeře, je  $x''_d = x''_q$  a

$$i''_0 = \sqrt{\frac{|u''_{qs}|^2 + |u''_{ds}|^2}{x_v + x''_d}} = \frac{|u''_s|}{x_v + x''_d} \quad (2.29)$$

Podmínkou samosynchronizace je, že budící vinutí musí být v době fázování k síti zkratováno, jinak by došlo k nebezpečnému přepětí na jeho svorkách a následným poruchovým stavům. Z několika málo výhod, které samosynchronizace přináší, můžeme jmenovat kratší dobu fázování nebo jednoduchou manipulaci. Značnou nevýhodou je pokles napětí soustavy v blízkosti připojovaného generátoru a výše zmiňované proudové a momentové rázy. Pokles napětí se dá do jisté míry snížit použitím generátoru s malou synchronní reaktancí, tedy s velkým zkratovým poměrem.

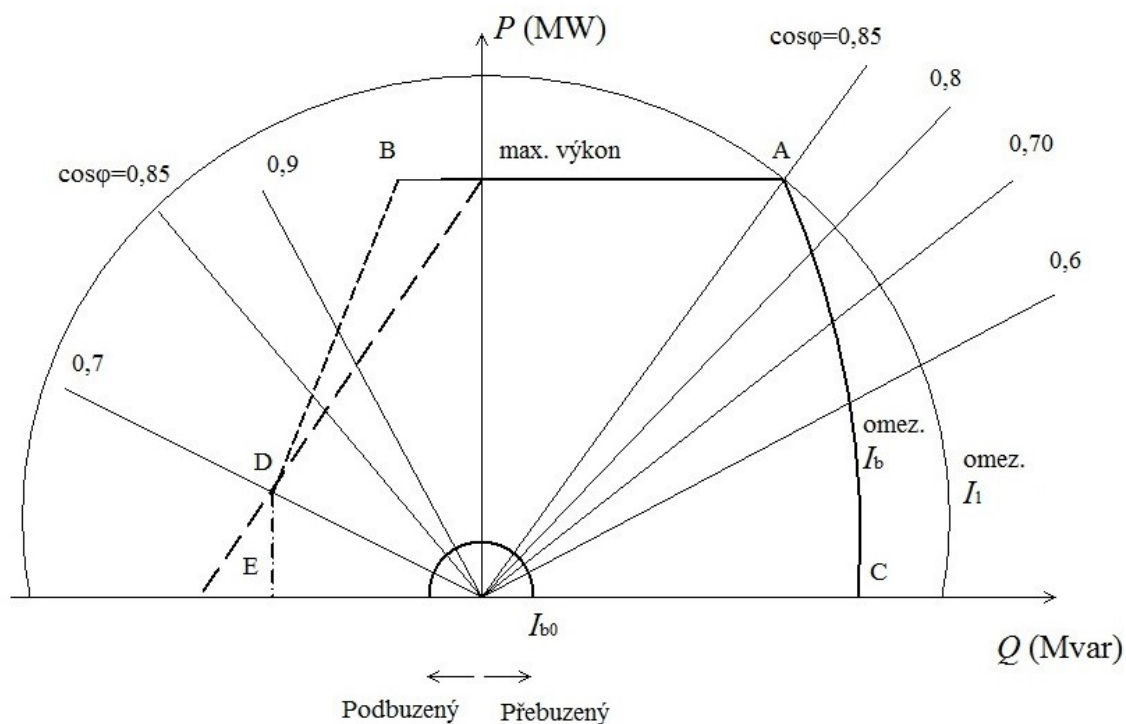
## 2.6 Fázování na tmu

Tento způsob fázování je velmi oblíbený pro svoji jednoduchost. Využívá se tří žárovek, přičemž každá jednotlivá žárovka je zapojena na jednu fázi generátoru a sítě. Žárovky se rozsvěčují a zhasínají s kmitočtem  $\beta$ , což je hodnota polovičního rozdílu kmitočtu napětí sítě a generátoru. Čím menší je rozdíl kmitočtů, tím se prodlužuje perioda rozsvěcování a zhasínání žárovek. V momentě, kdy jsou žárovky pohaslé, jsou splněny podmínky pro přifázování. Stačí pouze jedna žárovka, musíme mít ale jistotu správnosti sledu fází [1].

## 2.7 Provozní diagram:

Provozní diagram je diagram, ve kterém zjišťujeme v jakých stavech a při jakých hodnotách může stroj pracovat. Existují jisté omezující faktory, které brání stroji pracovat při určitých zatíženích. Nejzávažnější z nich jsou tyto [3]:

- oteplení budícího vinutí
- oteplení tělesa rotoru
- oteplení vinutí statoru
- oteplení magnetického obvodu statoru
- statická stabilita stroje



Obr. 16. P,Q diagram

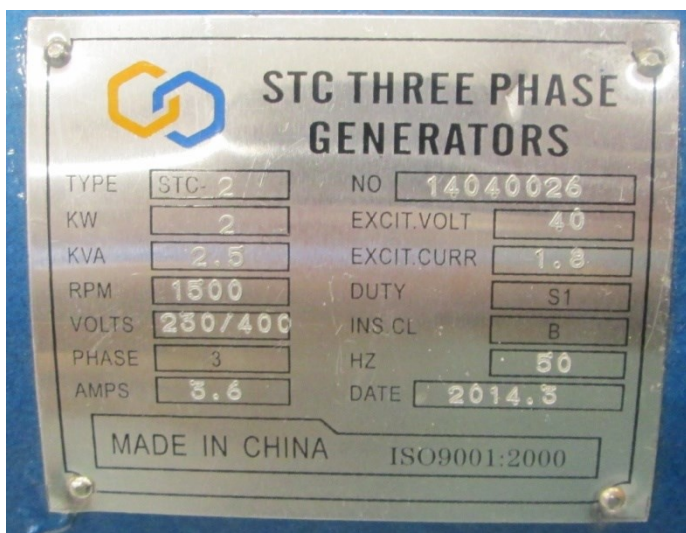
Jelikož alternátor nepracuje v motorickém režimu, redukuje se diagram na dva kvadranty. Kladná poloosa jalového výkonu představuje chod generátoru v přebuzeném stavu a záporná chod v podbuzeném stavu. Z diagramu je patrné, že provoz v podbuzeném stavu je značně omezen. Je to dáno vířivými proudy, které jsou značně větší, než v přebuzeném stavu. Způsobují oteplení v čelních prostorech statoru - oblast BD. Do jisté míry jsme omezeni i statickou stabilitou - oblast DE. Kružnice opsaná, procházející bodem A určuje jmenovitý chod stroje. Úsečka AB udává maximální výkon stroje vzhledem k proudovým omezením. Část vymezená křivkou AC je omezující pro stroj svým maximálním budícím proudem.

### 3 Praktická část

Cílem praktické části byla modifikace měřicí úlohy na benzínovém generátoru Güde 950. Moje úloha spočívala v proměření zatěžovacích charakteristik generátorického soustrojí, který sestává z asynchronního motoru 2,2kW (typ M2BA100LC4) a synchronního generátoru 230/400 V, 2kW (typ STC-2) do předmětu "elektrárny". Motor je napájený frekvenčním měničem ACS355 od firmy ABB. Pro eventuální přifázování synchronního generátoru k elektrizační síti slouží fázovací jednotka UniGEN. Generátor je cize buzený přes regulátor napětí UVR, který je napájený napájecím modulem uloženém ve stolu. Měření proběhlo v laboratoři elektroenergetiky EB015 na soustrojí motorgenerátor a měřicích stolech o těchto parametrech:

#### 3.1 Provozní parametry měřeného generátoru STC-2

Třífázový	S1
Výkon $P = 2 \text{ kW}$	$S = 2,5 \text{ kVA}$
otáčky $1500 \text{ min}^{-1}$	50 Hz
Stator $U_n = 400 \text{ V}$	$I_n = 3,6 \text{ A}$
Buzení $U_b = 40 \text{ V}$	$I_b = 1,8 \text{ A}$



Obr. 17. Štítek generátoru

### 3.2 Provozní parametry asynchronního motoru ABB M2BA 100 LC 4

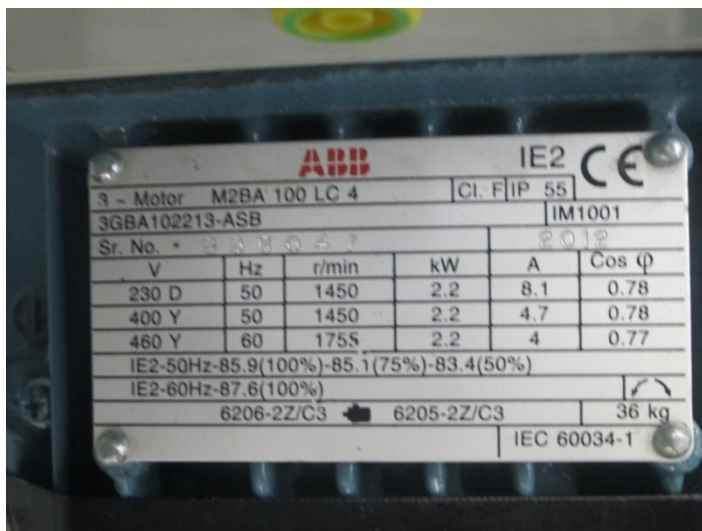
Třífázový

Stator zapojený do Y

$$U_n = 400 \text{ V} \quad I_n = 4,7 \text{ A}$$

$$P = 2,2 \text{ kW} \quad 1450 \text{ min}^{-1}$$

$$\cos \varphi = 0,78$$



Obr. 18. Štítek motoru



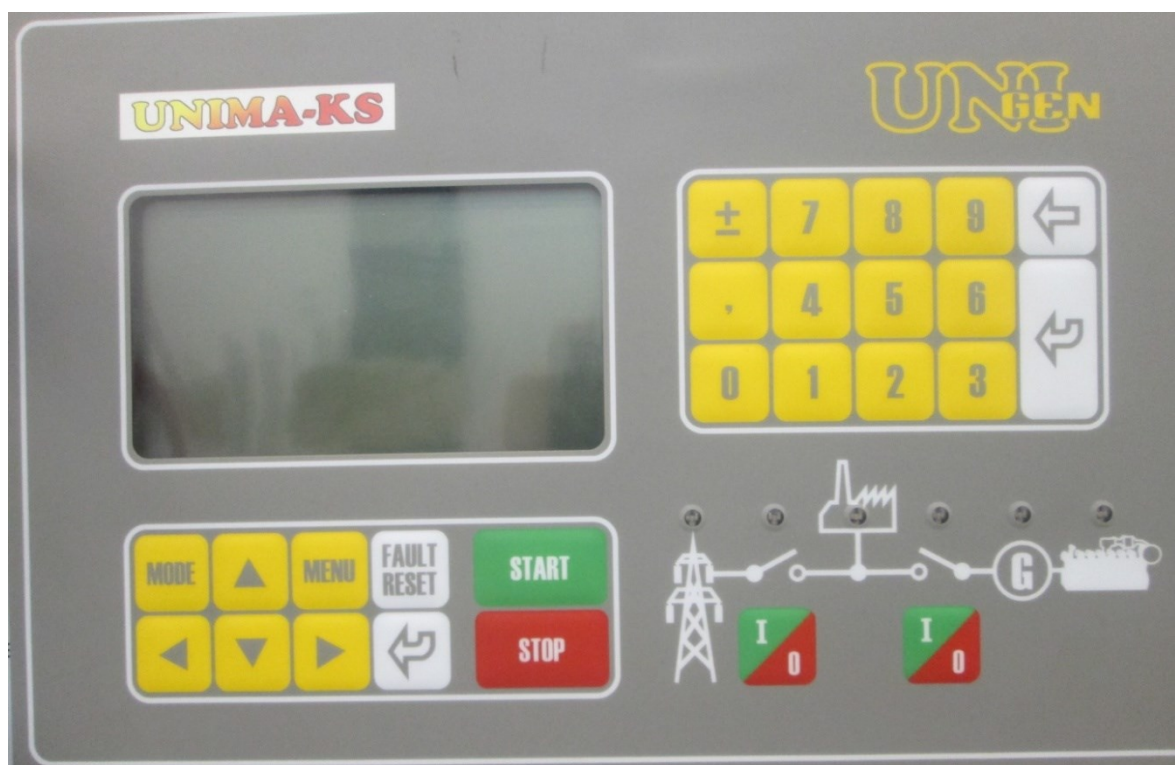
Obr. 19. Generátorické soustrojí

### 3.3 UniGEN

Základem jednotky je řídicí systém pro kogenerační jednotky a jiná motorgenerátorová soustrojí UniGEN s grafickým displejem, širokými možnostmi řízení, komunikace a konfigurovatelnosti.

UniGEN podporuje všechny režimy spolupráce se sítí P (paralelní), I (ostrovní), E (nouzový), P+I, P+E, rozdělování činného výkonu (v režimu P) a činného i jalového výkonu (v režimu I) mezi více strojů bez nutnosti nadřazeného řídicího systému. Umožňuje manuální i automatický režim ovládání, kopírování spotřeby objektu atd.

Firmware ŘS obsahuje kompletní algoritmy pro řízení kogenerační jednotky (hlídání provozních parametrů, regulace, fázování, zpětné fázování). Algoritmy ŘS je možné na uživatelské úrovni pomocí funkcí upravit dle specifik instalace. Pomocí mapování je možné konfigurovat analogové i binární vstupy a výstupy. ŘS lze monitorovat, kalibrovat, parametrizovat a vytvářet vlastní úpravy v algoritmu po jeho připojení k PC programem Manager [9].



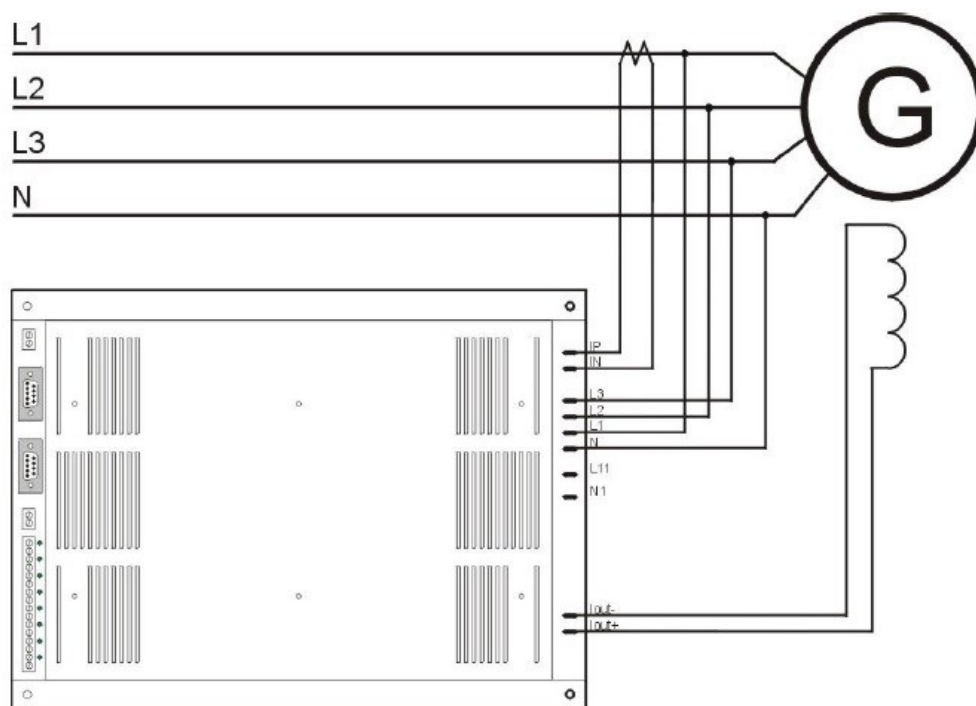
Obr. 20. Panel UniGENu

### 3.4 Regulátor napětí UVR

UVR je použit pro buzení a regulaci výstupního napětí generátoru. Pro paralelní připojení k síti automaticky reguluje účinník na požadovanou hodnotu, aby byly podmínky pro fázování co nejpřesnější. Je zde použit digitální PID regulátor, který reguluje napětí v jedné fázi generátoru až do



hodnoty 280 V. Na konektoru SGI je připojen vstup měřicího transformátoru proudu, který měří proud generátoru v rozmezí pracovních hodnot 0 až 5 A, což odpovídá toleranci proudového zatížení generátoru. Budicí proud se dá regulovat až po hodnotu 7,5 A a napětí až 80 V. Vzhledem k jmenovitým hodnotám budicího napětí a proudu synchronního generátoru, které jsou uvedeny na štítku můžeme konstatovat, že UVR je vhodný pro řízení buzení měřeného generátoru [10].



Obr. 21. Třífázové zapojení UVR

### 3.5 Frekvenční měnič ABB ACS355

#### Ovládací panel:

Měnič je přepnut v režimu lokálního ovládání pomocí tlačítka LOC/REM. Výstupní frekvence je nastavována šipkami, motor je spuštěn nebo zastaven tlačítky START, STOP.

#### Ruční řízení ovládacím napětím 0 – 10V:

Měnič je přepnut v režimu externího ovládání pomocí tlačítka LOC/REM. Výstupní frekvence je nastavována pomocí potenciometru „Otáčky generátoru“ na Jednotce pro fázování a ochranu generátoru, přepínač volby režimu je v poloze „Manuál“.

#### Automatické řízení:

Měnič je přepnut v režimu externího ovládání pomocí tlačítka LOC/REM. Přepínač volby režimu na jednotce pro fázování a ochranu generátoru je v poloze „Auto“. Řídicí systém UniGEN automaticky reguluje otáčky tak, aby byly splněny podmínky pro fázování.



Obr. 22. Měřicí stůl

### 3.6 Postup měření

Dle zadaného schématu Obr. 25 zapojíme celou měřicí úlohu. Zapneme napájecí modul, na panelu UniGENu zvolíme tlačítkem MODE manuální režim a nabudíme generátor na jmenovité hodnoty, ale nepřipojíme ho k síti. Přes regulovanou zátěž měníme hodnoty výstupních veličin generátoru. Po celou dobu měření musíme kontrolovat hodnoty budícího napětí a proudu, jestli nepřekročili jmenovité hodnoty, případně generátor přibudíme. Kvůli oteplení vodičů, které by mohlo do značné míry ovlivnit správnost měření, je nutné začít měřit od nejvyšších hodnot statorového proudu. Z měřicích přístrojů odečítáme sdružené hodnoty. Když připojíme induktivní nebo kapacitní zátěž, musíme dbát na konstantní účinník. Zkusíme ho odvodit pro induktivní zatížení.

$$u^2 = u_F^2 + u_L^2 \quad (3.1)$$

$$u^2 = I^2 R^2 + I^2 X_L^2 \quad (3.2)$$

$$u^2 = I^2 (R^2 + X_L^2) = I^2 Z^2 \quad (3.3)$$

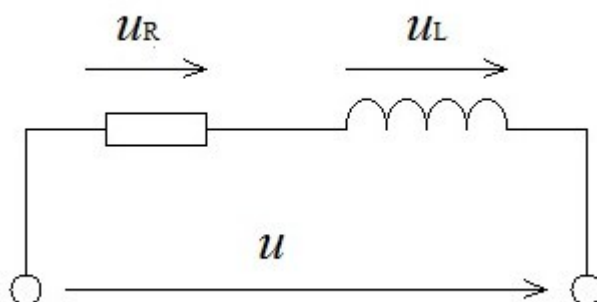
$$u = IZ \quad (3.4)$$



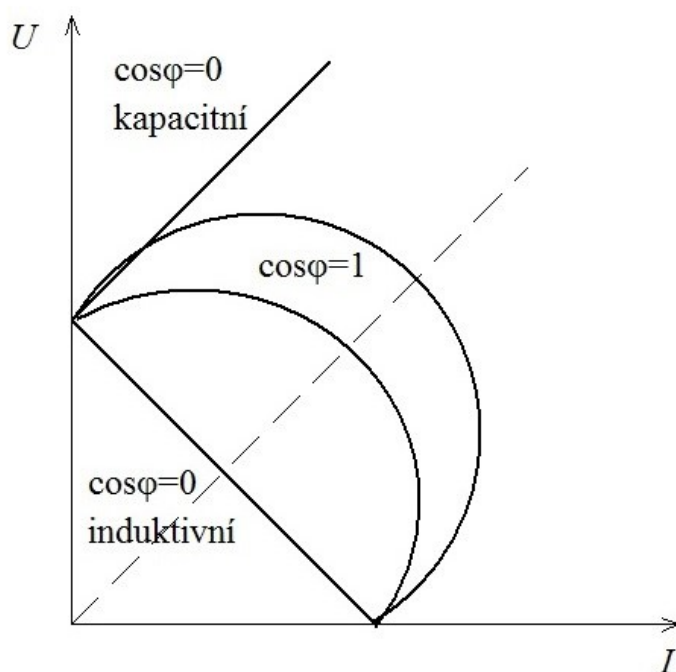
$$\cos\varphi = \frac{u_r^2}{u^2} = \frac{I^2 R^2}{I^2 Z^2} = \frac{R}{Z} \quad (3.5)$$

$$\varphi = \arccos \frac{R}{Z} \quad (3.6)$$

Podle uvedených vzorců je zřejmé, že pro konstantní účinník musíme zajistit stále stejný poměr činné a induktivní zátěže.



Obr. 23. Sériové spojení odporu a indukčnosti



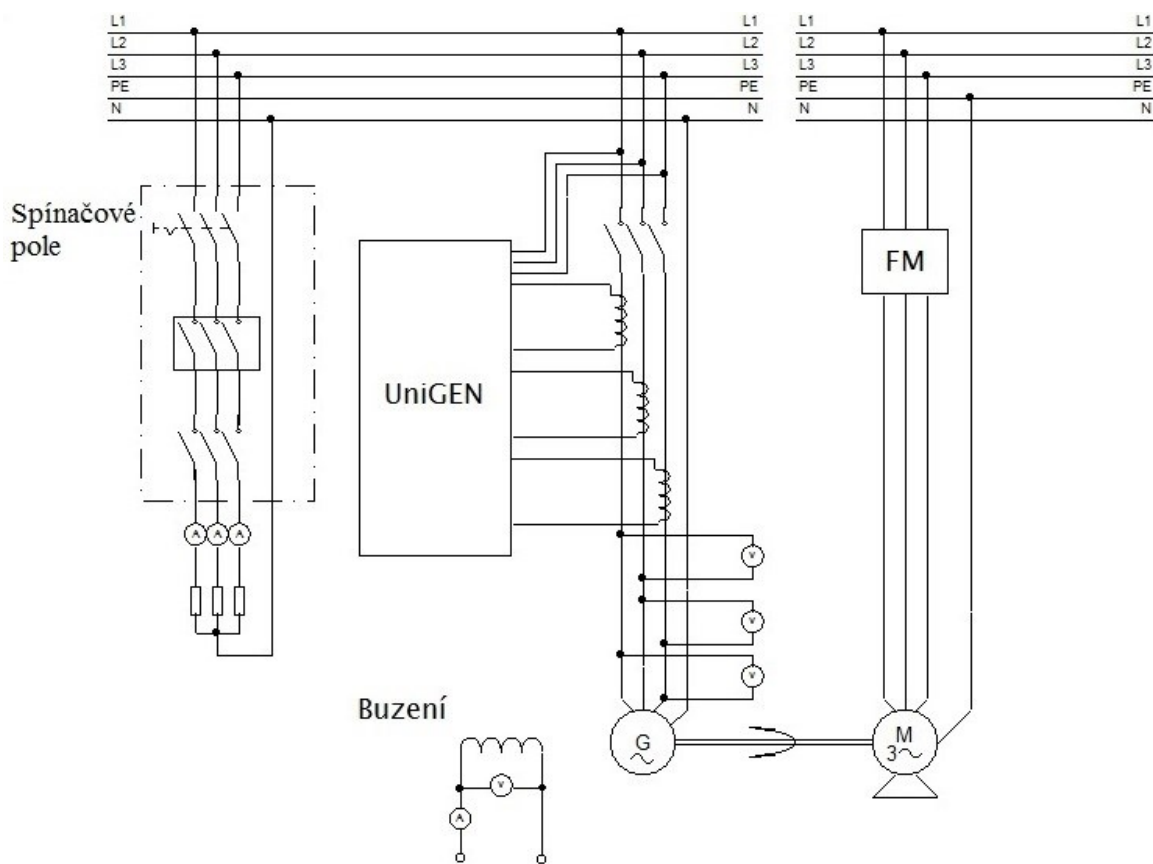
Obr. 24. Zatěžovací charakteristiky

Zatěžovací charakteristika se dá zjistit i pomocí výpočtů. Příslušné rovnice pro její konstrukci získáme z fázorového diagramu pro přebuzený stroj pracující v generátorickém režimu. Platí

$$U_{\text{ib}}^2 = (-U \cos\varphi + RI)^2 + (-U \sin\varphi + X_{\text{d}}I)^2 \quad (3.7)$$

$$Z_d I = RI + jX_d I \quad (3.8)$$

### 3.7 Schéma zapojení



Obr. 25. Schéma zapojení pro měření zatěžovacích charakteristik

### 3.8 Postup při fázování

Jak sem již předeslal dříve, fázování provádí řídicí systém UniGEN od firmy UNIMA-KS. Fázování se provádí ve dvou režimech:

Automaticky:

- nejdříve musíme pomocí tlačítka **MODE** nastavit automatický režim řídicího systému

- následně tlačítkem start sepneme přepínač SA2 do polohy zapnuto a uvede se do provozu generátorické soustrojí
- zařízení UniGENu nastavuje automaticky řídicí napětí 0 až 10 V pro frekvenční měnič tak, aby byly nastaveny synchronní otáčky fáze
- opět automaticky řídí regulátor napětí UVR buzení synchronního stroje na jmenovité hodnoty
- Po uplynutí doby, kdy jsou splněny všechny podmínky, systém sepne kontakt stykače KM1 a generátor se přifází k síti.

#### Manuální:

- sepneme přepínač SA2 do polohy zapnuto a uvedeme do chodu generátorické soustrojí
- výstupní frekvenci z měniče regulujeme otáčky motoru a přes převod přepočteme otáčky generátoru (převod 1:1)
- Pomocí napájecího modulu, který je součástí stolu a je spojen s řízením UVR, regulujeme buzení generátoru na požadovanou hodnotu. Hodnoty pro správné nafázování kontrolujeme na panelu UniGENu.
- Správnou shodu napětí, otáček a fáze zjišťujeme opět z měřicího stolu, jehož součástí jsou indikační žárovky. Žárovky jsou zapojeny pro fázování na tmu.
- Při splnění podmínek fázování je stykač KM1 sepnut tlačítkem SB1, které je následně přemostěno pomocným kontaktem KM1.

## **Závěr**

V první části této bakalářské práce jsem se zaměřil obecně na synchronní stroj, který pracuje v generátorickém režimu. Je zde popsána konstrukční část stroje s hladkým rotorem i s vyniklými póly, princip působení synchronního generátoru a jeho náhradní schéma se všemi důležitými parametry a základními vzorci.

V druhé části jsem se zaměřil na pravidla pro paralelní připojování generátoru k elektrizační síti. Uvedl jsem možné výchyly, které jsou přípustné, aniž by došlo k abnormálním stavům. V rámci praktické části jsem uvedl podrobný návod, jak pomocí fázovací jednotky UniGEN připojit měřený generátor k distribuční síti. Vymezil jsem základní provozní stavy, ve kterých se může stroj nacházet. Popsal jsem jak se chová generátor v ostrovním režimu a při paralelní spolupráci se sítí. Následně jsem přiřadil základní charakteristiky těmto režimům. Uvedl jsem provozní diagram a vymezil jsem v něm limitující faktory.

Poslední část bakalářské práce je věnována měření zatěžovacích charakteristik generátoru v ostrovním režimu na učebně EB015 a vytvoření laboratorního protokolu, který poslouží jako návod pro studenty druhých ročníků oboru elektroenergetiky. Při měření jsem reguloval výstupní hodnoty statorového proudu a napětí. Vycházel jsem z jmenovitých hodnot a postupně zvětšoval zátěž. Cílem nebylo proměřit celou charakteristiku, ale pouze prokázat její správnost, která by se shodovala s teoretickými průběhy. Při všech zatíženích vychází charakteristika ze stavu naprázdno při zadaném účinníku a budícím proudu. Při induktivním zatížení je vidět největší pokles napětí, neboť se zde uplatňuje reakce kotvy, která výsledné pole zeslabuje a tím i výstupní napětí. Naopak je tomu při kapacitním zatížení, kde se reakční pole přičítá k poli budícího obvodu. Výsledek je takový, že napětí stoupá úměrně proudu nad jmenovitou hodnotu. Tímto měřením jsem potvrdil správnost výsledků a proto je vhodný jako vzorový protokol.

Za přínos mé bakalářské práce považuji vytvoření protokolu, který poslouží jako studijní opora při dalších měřeních.

## Literatura

- [1] CHMELÍK, Karel. *Asynchronní a synchronní elektrické stroje*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2002. ISBN 80-248-0025-X.
- [2] IBLER, Zdeněk a Miloš BERAN. *Elektrárny II/*. 1. vyd. Plzeň: Vysoká škola strojní a elektrotechnická, 1982.
- [3] DOČEKAL, Antonín a Stanislav BOUČEK. *Elektrárny II: přednášky*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 1995. ISBN 80-01-01279-4.
- [4] MĚŘIČKA, Jiří, Václav HAMATA a Petr VOŽENÍLEK. *Elektrické stroje*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02109-2.
- [5] HRABOVCOVÁ, Valéria a Pavol Rafajdus. *Elektrické stroje teória a príklady*. Vyd. 1. Žilina: Žilinská univerzita, 2009. ISBN 978-80-554-0101-0.
- [6] DOLEŽAL, Jaroslav. *Jaderné a klasické elektrárny*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04936-5.
- [7] Pravidla provozování distribučních soustav: Příloha 4: Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribuční soustavy, 2014. 31 s.
- [8] ŘÍHA, Josef. *Elektrické stroje a přístroje*. Vyd 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986.
- [9] Královský, Z., Štol, P. UNIMA-KS Specifikace řídicího systému UniGEN, [online], 22.4.2016, dostupné z [http://www.unima-ks.cz/download/2/94/Specifikace-UniGEN-HW-V2-V\\_1\\_74.pdf](http://www.unima-ks.cz/download/2/94/Specifikace-UniGEN-HW-V2-V_1_74.pdf).
- [10] Královský, Z., Štol, P. UNIMA-KS Specifikace digitálního regulátoru napětí (účinníku) UVR (Unima Voltage Regulator), [online], 22.4.2016, dostupné z [http://www.unima-ks.cz/download/2/105/Specifikace-UVR-V\\_1\\_08.pdf](http://www.unima-ks.cz/download/2/105/Specifikace-UVR-V_1_08.pdf)
- [11] Synchronní stroje, [online], dostupné z <http://www.spse.dobruska.cz/download/sokol/SG.pdf>

## **Přílohy**

- A       Vzorový protokol pro studenty
- B       Tabulky pro jednotlivá zatížení
- C       Graf celkové zatěžovací charakteristiky

**A: Vzorový protokol pro studenty**

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroenergetiky



**název předmětu**

název měřicí úlohy

Zpracovali:

Skupina:

Forma studia:

Datum měření:

## **Zadání**

- 1) změřte zatěžovací charakteristiku synchronního generátoru pro jednotlivé typy zatížení (odporovou, induktivní kapacitní), při konstantním  $U_b$ ,  $I_b$ ,  $n$  a  $\cos\varphi$
- 2) Z naměřených hodnot vynesete charakteristiky  $U_1 = f(I_1)$

## **Seznam přístrojů**

## **schéma zapojení**

## **Postup měření**

## **Naměřené hodnoty**

## **Grafické znázornění**

## **Závěr**



## Příloha B: Tabulky pro jednotlivá zatížení

### Tabulky naměřených hodnot při čistě činné zátěži

Tab. 2. Nastavené jmenovité hodnoty generátoru

$U_b$ (V)	28,1
$I_b$ (A)	2,02
$\cos\varphi$	1

Tab. 3. Naměřené hodnoty napětí a proudů statoru

$U_1$ (V)	$U_2$ (V)	$U_3$ (V)	$U_f$ (V)	$I_1$ (A)	$I_2$ (A)	$I_3$ (A)	$I_k$ (A)
210,19	210,12	210,09	210,17	2,002	2,001	2,006	2,003
216,17	216,01	216,05	216,03	1,8	1,829	1,833	1,833
219,38	219,23	219,27	219,29	1,6	1,6	1,6	1,6
221,16	221,1	221,14	221,1	1,4	1,395	1,4	1,399
223,17	223,08	223,1	223,14	1,201	1,206	1,207	1,204
224,28	224,09	224,3	224,26	1,097	1,098	1,091	1,095
227,7	227,5	227,58	227,51	0,735	0,737	0,737	0,737
228,64	228,57	228,61	228,57	0,6	0,6	0,602	0,601
230,6	230,55	230,56	230,52	0,396	0,399	0,398	0,397
232	231,87	231,96	231,93	0,227	0,23	0,227	0,228
233,3	233,27	233,34	233,35	0,001	0,001	0,001	0,001

## Tabulky naměřených hodnot pro induktivní zátěž

Tab. 4. Nastavené jmenovité hodnoty generátoru

$U_b$ (V)	28,9
$I_b$ (A)	2,02
$\cos\varphi$	0,8

Tab. 5. Naměřené hodnoty napětí a proudů statoru

$U_1$ (V)	$U_2$ (V)	$U_3$ (V)	$U_f$ (V)	$I_1$ (A)	$I_2$ (A)	$I_3$ (A)	$I_k$ (A)
188,47	188,43	188,05	188,31	2,108	2,114	2,137	2,12
195,88	195,88	195,58	195,73	1,814	1,82	1,838	1,824
200,82	200,81	200,65	200,72	1,598	1,605	1,62	1,608
205,14	205,14	205,08	205,13	1,429	1,416	1,421	1,422
209,71	209,76	209,93	209,82	1,223	1,205	1,197	1,209
214,77	214,72	214,94	214,74	0,991	0,983	0,964	0,979
218,46	218,53	218,75	218,59	0,818	0,792	0,775	0,796
223	222,93	223,28	223,09	0,587	0,572	0,554	0,571
226,62	226,74	226,9	226,73	0,399	0,378	0,368	0,382
230,03	230,22	230,33	230,23	0,224	0,203	0,209	0,212
233	233	233	233	0	0	0	0

## Tabulky naměřených hodnot pro kapacitní zátěž

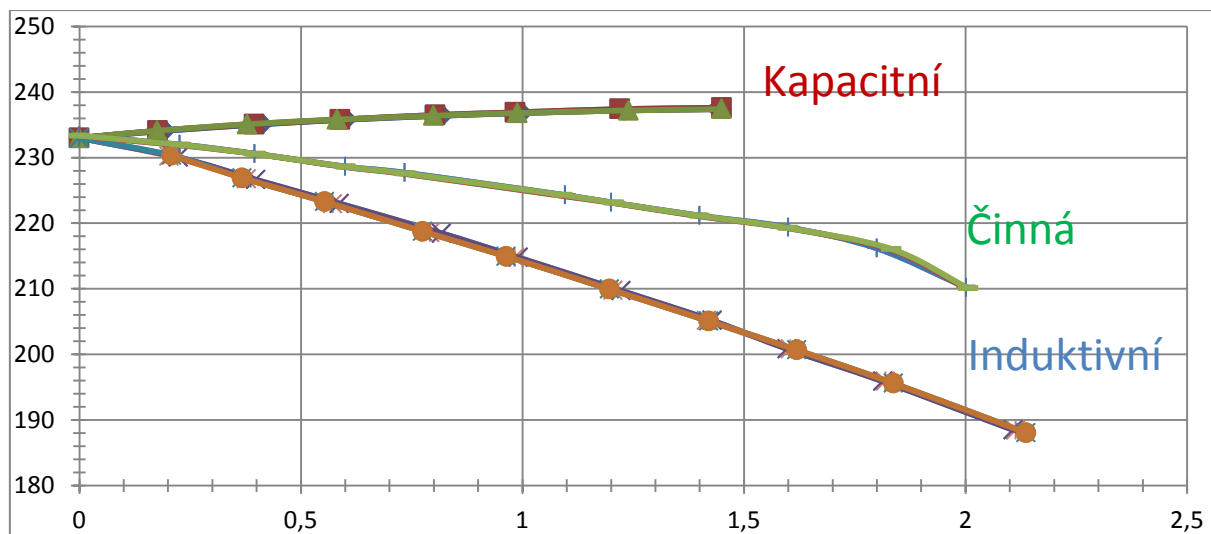
Tab. 6. Nastavené jmenovité hodnoty generátoru

$U_b$ (V)	28,3
$I_b$ (A)	2,01
$\cos\varphi$	0,8

Tab. 7. Naměřené hodnoty napětí a proudů statoru

$U_1$ (V)	$U_2$ (V)	$U_3$ (V)	$U_f$ (V)	$I_1$ (A)	$I_2$ (A)	$I_3$ (A)	$I_k$ (A)
237,4	237,6	237,6	237,5	1,44	1,45	1,45	1,45
237,2	237,4	237,3	237,3	1,23	1,22	1,24	1,23
236,8	236,9	236,9	236,9	1	0,984	0,989	0,991
236,4	236,5	236,5	236,5	0,821	0,803	0,8	0,808
235,8	235,8	235,9	235,8	0,604	0,589	0,582	0,592
235,1	235,1	235,2	235,1	0,414	0,395	0,379	0,396
234,1	234,1	234,1	234,1	0,194	0,177	0,176	0,182
233	233	233	233	0	0	0	0

### Příloha C: Graf celkové zatěžovací charakteristiky



Obr. 26 Graf zatěžovacích charakteristik